

На правах рукописи



ЮСУПОВ КАМИЛЬ МАРАТОВИЧ

**ТОНКАЯ СТРУКТУРА ОТРАЖЕНИЙ ОТ
СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2011

Диссертационная работа выполнена на кафедре радиоастрономии в Институте физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: зав. каф. радиоастрономии,
кандидат физико-математических наук
Казанский федеральный университет
Акчурин Адель Джавидович.

Официальные оппоненты: зав. каф. радиофизики,
доктор физико-математических наук,
Казанский федеральный университет
профессор Шерстюков Олег Николаевич.

зав. каф. высшей математики,
доктор физико-математических наук,
Марийский государственный технический
университет
профессор Иванов Дмитрий Владимирович.

Ведущая организация: ФГНУ Научно-исследовательский
радиофизический институт г.Нижний
Новгород

Защита диссертации состоится 23 июня 2011 г. в 16 ч. 00 мин в ауд. 210 Института физики на заседании Диссертационного совета Д212.081.18 в ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Автореферат разослан 20 мая 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного

совета д.ф.-м.н, профессор



А.В. Карпов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящий момент для исследования отражающих свойств и причин происхождения слоя Es применяются различные методы: вертикальное, ЛЧМ-, наклонное и возвратно-наклонное зондирования, некогерентное рассеяние, GPS-мониторинг, ракетные и др. Эти методы являются основными источниками информации о структуре и динамике слоя Es. Детальное знание свойств слоя Es имеет большое практическое значение, т.к. слой Es воздействует на распространение радиоволн вплоть до гигагерцового диапазона. Если в КВ диапазоне вариации электронной концентрации Es-слоя приводят к разрыву связи, то в гигагерцовом – к изменению фазы радиосигналов. Поэтому необходимо прогнозировать и учитывать влияние слоя Es на условия распространения радиоволн в заданных интервалах времени при известном техническом оборудовании.

Согласно [1-3] слой Es – это локальное и случайное плазменное образование, появляющееся в интервале высот 90-150 км. Параметры слоя Es трудно прогнозировать в связи со случайностью появления слоя Es и отсутствием длительных наблюдений параметров слоя с помощью ракетной техники, а также с многообразием физических явлений, оказывающих воздействие на образование и существование слоя Es.

Наибольшее количество информации о спорадическом слое E накоплено с помощью ионозондов, при этом важнейшей задачей исследований является получение профиля электронной концентрации. Известные в настоящее время теоретические и эмпирические модели ионосферы достаточно хорошо описывают спокойную ионосферу, ее зависимость от магнитной возмущенности солнечной активности, а также средние долготные, широтные, суточные и сезонные изменения. Эти модели имеют большую практическую ценность, например, для выбора оптимальных условий радиосвязи, оценки ситуации в приземной плазме, расчета конкретных радиотрасс и т.д. К сожалению, даваемое моделями значение электронной концентрации может отличаться от реальной ионосферной обстановки на десятки (в среднем на 30) процентов.

Существует несколько путей совершенствования моделей, но требование повышения точности сведений об электронной концентрации влечет за собой необходимость учета как можно большего числа факторов, оказывающих влияние. Так, информативность классических ионозондов можно повысить за счет исследования взаимодействия различных магнитоионных компонент [4-7].

Взаимодействие магнитоионных компонент при отражениях от слоев F и Es должно носить различный характер. В связи с тонкостью Es слоев, разность высот отражения между магнитоионными модами (компонентами)

сравнима не только с длительностью импульсов, но и с длинами волн. Такая близость точек отражения позволяет исследовать явление интерференции магнитоионных компонент.

Согласно современным воззрениям, взаимодействие магнитоионных мод может носить не только интерференционный характер, но и возможность перехода одной компоненты в другую. Для исследования таких тонких эффектов необходимо применять как учащенный режим зондирования, так и методики определения высоты отражения с максимально возможной точностью.

Между тем в литературе отсутствует сколько-нибудь систематическое исследование интерференционных биений магнитоионных компонент сигналов, отраженных от слоя Es.

Решению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

Целью диссертационной работы является: исследование свойств сигналов, отраженных от слоя Es при вертикальном зондировании ионосферы в учащенном режиме зондирования.

Исходя из указанной цели, поставлены **следующие задачи**:

1. Спроектировать, изготовить и протестировать новую систему управления ионозонда «Циклон» на шине PCI с GPS-синхронизацией по времени (необходимой для наклонного зондирования), позволяющую реализовать зондирование в учащенном режиме (1 мин) и применять алгоритм повышения точности определения действующей высоты методом максимального правдоподобия в спектральной области (ММП) [8,9].
2. Для детального изучения вариаций действующей высоты отражения следов Es оценить точность определения действующей высоты методом ММП на тестовых ионограммах (с искусственными следами) и на полученных при вертикальном зондировании ионограммах, содержащих следы Es с многократными отражениями.
3. Выполнить исследование параметров слоя Es, характеризующих его структуру и отражающие свойства, методом вертикального зондирования в учащенном режиме.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые на продолжительном интервале времени при вертикальном зондировании (со скоростью регистрации 1 ионограмма в минуту) детально исследованы экспериментальным путем зависимости амплитудно-частотных характеристик слоя Es.
2. Впервые исследованы квазипериодические биения амплитудно-частотных характеристик слоя Es.
3. Впервые определены вероятности появления слоев Es в зависимости от структуры отражения.

4. Впервые установлено, что на частотах выше критической частоты слоя E на величину гирочастоты электронов (f_H) квазипериодические биения следов Es возникают из-за интерференции о- и х-мод.
5. Впервые показано, что параметры интерференционной картины следов Es могут быть использованы в определении величины фоновой концентрации ниже максимума E-слоя.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

1. Разработана новая система управления ионозонда «Циклон» с GPS-синхронизацией по времени (необходимой для наклонного зондирования) на основе современной элементной базы (ПЛ СБИС), подключаемая к шине PCI с возможностью реализации алгоритма повышения определения действующей высоты методом максимального правдоподобия в спектральной области (ММП).
2. Разработаны новые формы представления долговременных последовательностей учащенно снятых ионограмм, позволяющих не только показывать вариации действующих высот отражения, критических и предельных частот, но и исследовать тонкую структуру отражений слоев ионосферы.
3. Составлен банк ионограмм с 1 минутной периодичностью регистрации за годовой период измерений.
4. Предложена методика, использующая тонкую структуру и модельные представления об ионосфере, в определении некоторых ионосферных параметров непосредственно нерегистрируемых на обычных ионозондах.

Реализация результатов работы:

Разработанная система управления ионозондом внедрена в Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), имеются соответствующие документы о внедрении.

На защиту выносятся:

1. Частотные и высотные вариации параметров квазипериодических биений амплитудно-частотной характеристик слоя Es.
2. Вероятностные параметры появления слоев Es в зависимости от его структуры отражения.
3. Объяснение основной причины появления наблюдаемых квазипериодических биений амплитудно-частотных характеристик слоя Es в диапазоне частот выше критической частоты слоя E на величину гирочастоты электронов.
4. Формы представления долговременных последовательностей ионограмм, позволяющие не только показывать вариации действующих высот

отражения, критических и предельных частот, но и исследовать тонкую структуру отражений от слоев ионосферы.

5. Методика определения критической частоты слоя E (f_oE) по начальной границе диапазона биений следов Es в случае расположения f_oE ниже начального частотного порога регистрации ионозонда.
6. Методика определения электронного содержания (ЕС) ниже максимума слоя E, используя параметры интерференционной картины следов Es.

Достоверность результатов обусловлена большим объемом проведенных исследований за 2010 г., статистической надежностью измерений, совпадением результатов измерений и обработанных данных с модельными представлениями и с выводами других авторов.

Апробация работы и публикации:

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на международной конференции IRI/COST Workshop в г. Прага (Чехия, 2007 г.), на Второй Волжской региональной молодежной научной конференции "Радиофизические исследования природных сред и информационные системы" в г. Зеленодольске (2010 г.), на V международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения" в г. Казани (КГЭУ, 2010 г.), на юбилейной конференции Физического факультета КФУ (2011 г.), на ежегодных итоговых конференциях КФУ (КГУ) 2005-2010.

По материалам диссертации опубликовано 8 работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень научных изданий ВАК, рекомендованных для публикации основных результатов диссертации.

Результаты работы реализованы при поддержке грантов: РФФИ 06-05-65150 (2006-2008 г.), ДЗН 09-9 (2009 г), ДЗН 1-27 (2010 г), П11-23 1.23.11(2011 г).

Личный вклад автора:

Автор спроектировал и изготовил схемы, дополнительную плату системы управления ионозонда "Циклон", создал формы представления долговременного потока учащенно снятых ионограмм, осуществлял обработку, анализ, интерпретацию и моделирование результатов измерений параметров слоя Es. Автором сформулированы научные выводы и положения, которые выносятся на защиту.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 140 страниц основного текста, 41 рисунок, 5 таблиц и список литературы из 112 наименований.

Во введении обосновывается актуальность работы, отмечается ее научная новизна, практическая ценность, цель и задачи диссертации.

В первой главе диссертации приводится обзор исследований параметров слоя Es, которые влияют на свойства отраженных радиосигналов методом вертикального зондирования.

Показывается, что для исследования слоя Es применяются методы: вертикальное, ЛЧМ-, наклонное, возвратно-наклонное зондирования, некогерентное рассеяние, GPS-мониторинг и ракетные измерения. Наиболее подробно рассмотрен метод вертикального зондирования, т.к. с этим методом связана тема исследования.

Описаны существующие методы определения действующей высоты отражения слоев ионосферы, позволяющие повысить точность (относительно типовой 2,5-5 км).

Спорадический слой E – это слой ионосферы, обычно располагаемый в высотном диапазоне 85–150 км. Такие слои являются тонкими слоями с повышенной электронной концентрацией и имеют толщину от нескольких сотен метров до 6 км (и более), а их горизонтальная протяженность может превышать сотни километров. Вариации действующих высот слоя Es ($h'Es$) изучаются на основе данных вертикального зондирования. Из-за группового запаздывания действующие высоты могут отличаться от истинных, тем не менее, этот метод широко используется для исследования суточных и сезонных изменений высот слоя Es.

Основное внимание уделено результатам изучения отражающих свойств слоя Es с помощью ионозондов. Главной особенностью слоев Es является полупрозрачность, поэтому рассматриваются результаты экспериментальных исследований этого явления. На основе этих экспериментов выделено три основных механизма, в результате которых слой Es мог стать полупрозрачным. Первый механизм – это облачная модель, которая связывает частоту экранирования (f_bEs) и предельную частоту (f_oEs) с плазменными частотами фоновой ионизации и уплотнений электронной плотности, второй – с рассеянием на неоднородностях, встроенных в слой, третий – с отражениями от крутого градиента электронной концентрации тонкого горизонтально однородного слоя Es с взаимодействием мод [10-12].

Рассмотрены эксперименты, в которых исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) Es-следов в диапазоне полупрозрачности. Так, в ряде случаев наблюдались квазипериодические биения АЧХ, объясняемые третьим механизмом с помощью взаимодействия двух обыкновенных волн. Показаны основные свойства АЧХ следов Es с биениями, а также оценки величины градиента электронной концентрации в диапазоне биений слоя Es.

Описаны результаты, полученные с помощью современных методов цифровой обработки сигналов, позволяющих в автоматическом режиме не только интерпретировать одиночные ионограммы, но и способствующих развитию новых форм представления долговременного потока учащенно снятых

ионограмм. Показано, что использование современных форм представления большого потока ионограмм повышает информативность ионозондов в ряде исследований высотных вариаций, вероятностей появления и структуры отражений от слоя Es, а также способствует простой состыковке результатов вертикального зондирования с другими методами.

Ставятся задачи по дальнейшему исследованию структуры отражений и вариаций АЧХ слоя Es на средних широтах, требующих проведения модернизации системы управления ионозонда "Циклон", а также по разработке новых форм представления долговременных потоков данных вертикального зондирования.

Во второй главе диссертации описывается экспериментальная аппаратура по исследованию слоя Es методом вертикального зондирования.

Показано, что для более детальных изучений структурных особенностей слоя Es необходима регистрация его параметров с повышенной точностью определения действующей высоты в учащенном режиме зондирования через ~1 мин. Для этого необходима модернизация предшествующей системы управления ионозонда "Циклон". До модернизации управление периферийными устройствами ионозонда осуществлялось посредством ЭВМ и системы управления, связанных между собой по шине ISA (Industry Standard Architecture). Недостатком данной системы управления является использование морально устаревшей шины ISA. Кроме того, блок управления требует наличия трех слотов ISA, что в современных компьютерах большая редкость. При этом некоторые платы системы управления были выполнены навесным монтажом. К тому же, предшествующая система управления не имела общего тактового генератора, что приводило к нежелательному фазовому дрейфу при измерениях. В данной системе отсутствует также привязка к шкале времени, что не позволяет производить наклонное зондирование ионосферы.

Описана новая система управления ионозонда "Циклон" [13] с синхронизацией от GPS-часов (необходимой для реализации наклонного зондирования), позволяющая организовать алгоритм определения действующей высоты с повышенной точностью. Новая система управления разработана на основе заводского отладочного комплекта, содержащего программируемую логическую интегральную микросхему большой емкости (ПЛИС), позолоченного краевого ламельного разъема PCI (Peripheral Component Interconnect) и 44 свободных контактов (сгруппированные в разъемы, называемые Santa Cruz Connectors) для подключения внешних устройств. Эти контакты использованы для подключения дополнительной платы, спроектированной для стыковки отладочного комплекта с исполнительными устройствами ионозонда и содержащей конверторы уровней, цифровые ключи, микросхемы распределения сетки тактовых частот и прямого цифрового синтеза частот (ПЦСЧ, DDS), а также усилители фильтры.

В феврале 2010 г. новая система управления ионозондом вступила в работу с ежедневной регистрацией ионограмм с 1 мин периодичностью.

В третьей главе диссертации предложена новая форма представления долговременных последовательностей ионограмм, показывающая высотные вариации слоев ионосферы с помощью Н-карты в координатах высота-время-амплитуда. Н-карта формируется последовательным приложением высотных 3D-гистограмм (сумма амплитуд ионограммы вдоль оси частот) друг к другу для всех ионограмм целого дня измерений. Такие карты позволяют определить существование кратных отражений, скорости приливов, одновременное существование двух Es-слоев и множество других явлений ионосферы.

Проведение исследования тонкой структуры отражения слоя Es требует изучения высотных вариаций следов с повышенной точностью, но для этого необходимо оценить точность определения действующей высоты по отраженным сигналам, записанным с помощью новой системы управления ионозонда «Циклон». Показаны результаты оценки точности определения действующей высоты по тестовым ионограммам с искусственными следами.

Проверка заключалась в получении тестовых ионограмм с помощью аппаратных средств новой системы управления, при этом в ходе эксперимента создавались два вида тестовых ионограмм. Первая разновидность ионограмм (с горизонтальным искусственным следом) составлялась из радиоимпульсов с различными частотами заполнения, но с одинаковыми временами задержек и длительностями импульсов. Вторая разновидность (с наклонным искусственным следом) отличалась от первой тем, что каждый последующий импульс был сдвинут относительно предыдущего на 0,1 км [13]. Таким образом, общий рост высоты для одной тестовой ионограммы с наклонным следом составил 40 км. Для определения действующей высоты отражения таких ионограмм, применялась методика ММП [8,9], описанная в первой главе.

Результаты оценки точности для различных длительностей импульсов и вариантов подключения АЦП приведены в таблицах. Точность для некоторых тестовых сигналов с длительностью импульсов 70 мкс при большом соотношении сигнал/шум равна значению ~ 72 м. Среднее значение точности для всех тестовых ионограмм (при различных отношениях сигнал/шум и с различных длительностях импульсов) составило $\sim 0,197$ км (при типовой точности ионозонда $\sim 2,5$ км).

Описаны результаты оценки точности определения действующей высоты отражений от слоя Es при наличии многократных отражений. Чтобы выполнить такую оценку, необходимо выбрать такие ионограммы, на которых зарегистрированы следы Es и 2Es без рассеяния. Первый этап проверки заключался в определении действующей высоты $h'Es$ для следа Es и $h'2Es$ для следа 2Es методом ММП. На следующем этапе находилась разность между этими действующими высотами $\Delta h = h'2Es/2 - h'Es$. В качестве показателя точности был

выбран интерквартильный диапазон распределения значений Δh , который составил величину ~ 300 м. Эта точность (для следов Es) получилась ниже аппаратной точности (для тестовых ионограмм), что связано с изменением действующей высоты отражения от слоя Es с ростом частоты зондирования и с влиянием фоновой концентрации E-области.

В четвертой главе исследуется отражающая способность слоя Es при вертикальном зондировании, при этом часто наблюдаются квазипериодические биения АЧХ слоя Es. Пример одной из таких ионограмм приведен на рис. 1 а. Ниже ионограммы на рис. 1 а приведены АЧХ слоев E и Es двумя способами представления. Первый традиционный 2D-график АЧХ слоев E и Es (рис. 1 в) удобен для исследования АЧХ одного следа. Вторым способ – представление АЧХ слоев E и Es в виде 3D-карты (с фиктивной вертикальной координатой), где амплитуды отражений изображены на основе цветовой шкалы (рис. 1 б).

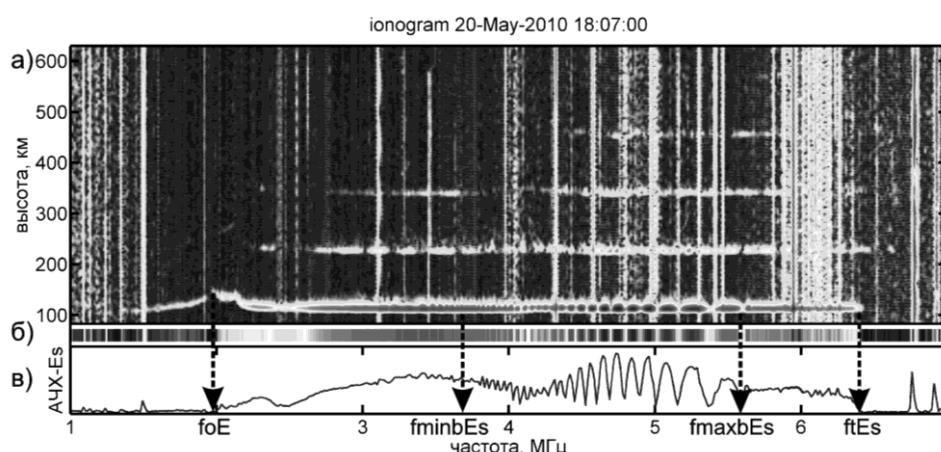


Рис. 1. Пример ионограммы и АЧХ, показывающих квазипериодические вариации амплитуд следа Es в диапазоне частот $\sim 3,7$ - $5,7$ МГц. (а) – ионограмма, (б) – АЧХ слоев E и Es на основе цветовой шкалы амплитуд, (в) – традиционные АЧХ слоев E и Es.

Предложена новая форма представления данных (с помощью А-карты, образованной из АЧХ следов E и Es таких как на рис. 1 б, пример приведен на рис. 2), позволяющая определить как критические частоты слоев ионосферы, так продолжительность устойчивой картины биений и зависимость от времени суток частотного диапазона биений. С помощью А-карты также не сложно определить как полную вероятность появления отражений от слоя Es (PEs), так и вероятность в зависимости от структурных особенностей отражений [14].

Проведен анализ статистики появления слоя Es в зависимости от структуры отражения. В июне 2010 г. при $\sim 82\%$ среднемесячной полной вероятности появления отражений от слоя Es наибольшая условная вероятность с величиной 73% наблюдается у слоя Es со свойствами рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Вероятность появления слоя Es без биений составила 15% , а с биениями – 12% [14].

Установлено, что продолжительность устойчивой картины биений от слоя Es варьируется от ~10 мин до ~5 ч в летние месяцы, для слоев Es типов *f*, *l* и *h* биения возникают только тогда, когда наблюдаемая частотная протяженность следа Es больше половины гирочастоты электронов. Для слоя Es типа *c* частотная протяженность должна быть больше гирочастоты электронов (из-за наличия рожка на следе) [14].

Показано, что расположение частотного диапазона биений зависит от наличия фоновой концентрации слоя E. Конечная граница диапазона биений примерно равна предельной частоте слоя Es ($f_{\max bEs} \approx f_{oEs}$). Независимо от величины $f_{\min bEs}$ для слоев типов *f*, *c*, *l*, и *h* в диапазоне биений АЧХ наблюдается увеличение частотного расстояния между последовательными минимумами с ростом частоты зондирования. Уменьшение частотного расстояния между последовательными минимумами АЧХ слоя Es наблюдается редко и, в основном, в ночное время. Если такие следы слоя Es наблюдаются, то они содержат два участка диапазона биений: в первом (низкочастотная часть следа Es) частотное расстояние между последовательными минимумами увеличивается, во втором (высокочастотная часть следа Es) это расстояние уменьшается [14].

Частотное расстояние между последовательными минимумами АЧХ слоя Es является показателем разницы действующих высот отражения между о- и х- модами с чувствительностью ~200 м. На частотах появления интерференционных биений частотное расстояние между последовательными минимумами соответствует 30-45 кГц, с увеличением частоты зондирования это расстояние увеличивается до 150-700 кГц. Частотному расстоянию между последовательными минимумами в 30 кГц (700 кГц) соответствует разница между действующими высотами о и х- мод в 5 км (0,21 км). Частотная протяженность диапазона биений варьируется от 0,5 МГц до 2,5 МГц.

Проведено детальное изучение высотного расположения Es слоев во время существования интерференционных биений. К отраженным импульсам применена методика оценки действующей высоты методом ММП [8,9]. Для анализа были выбраны ионограммы, содержащие как рожки х-следов Es типа *c*, так и биения на следе. Такой выбор позволяет, с одной стороны, воспользоваться методикой ММП отдельно для о- и х-следов, пока они не сольются, а с другой, по высотным вариациям в зоне наложения следов попытаться определить причину возникновения биений. Показано, что биения на следах Es начинают появляться, когда разность действующих высот отражения между о- и х-следами Δh достигает ~5 км, и возникают из-за интерференции о- и х-мод.

Используя расстояния между минимумами интерференционной картины $\Delta(f)$, определены разности между действующими высотами отражения о- и х-мод от слоя Es: $\delta h = c / (2\Delta f)$ [5]. Отличия между разностями

высот отражений Δh и δh , оцененных различными методами, укладываются в интервал ± 300 м.

Определена аппроксимирующая зависимость расстояния между последовательными интерференционными минимумами от частоты зондирования $\Delta(f)$. Приведены примеры ионограмм с квазипериодическими биениями слоя Es и с такой же частотной сеткой график зависимости разности частот между последовательными минимумами АЧХ от частоты зондирования. Для 50 ионограмм, зарегистрированных в дневные часы в различные времена года, найдены коэффициенты аппроксимации зависимости вида $\Delta(f)=a_0+a_1f+a_2f^2$. Близкие значения коэффициентов аппроксимации говорят о существовании единого механизма, отвечающего за образование биений при различных f_{minbEs} и f_{maxbEs} . Значение общей ошибки параболической аппроксимации составило величину $\sim 3\%$ от минимального расстояния между минимумами. Для описания зависимости расстояний между последовательными минимумами от частоты зондирования достаточна параболическая аппроксимация.

Отмечается, что схожая интерференционная картина для сигналов, отраженных от слоя F (поляризационный фединг) была исследована ранее [4-7]. Отличительной характерной чертой биений на следах F2 при вертикальном зондировании является наличие двух участков с разными свойствами АЧХ следов F2, симметричных относительно точки нулевых биений f^* (f^* – частота зондирования, на которой разность действующих высот о- и х-мод стремится к нулю) [5,6]. На первом участке частотное расстояние между последовательными минимумами увеличивается, на втором – это расстояние уменьшается. Приведены примеры и основные свойства таких АЧХ с биениями слоя F.

Для проверки полученных нами экспериментальных результатов произведены модельные вычисления групповой задержки о- и х-мод слоя Es в зависимости от электронной концентрации E-слоя (на основе профилей IRI) с учетом магнитного поля Земли. По модельным ионограммам вычислены вариации начальной границы биений и точки нулевых биений следов Es. Показано, что начальная граница диапазона биений находится выше на величину гирочастоты электронов (f_H) относительно критической частоты слоя E, как и на экспериментальных ионограммах. Для демонстрации такого поведения вариаций частотных параметров f_oE и f_{minbEs} на рис. 2 приведен пример А-карты для 20 мая 2010 г. (содержащий отражения только от слоев E и Es). На рис. 2 отражены: вариации f_oE (кривая – 1), f_{minbEs} (кривая – 2) и f_oE+f_H (кривая – 3, удаленная относительно f_oE на величину f_H). Видно, что во время появления биений на следах Es величина f_{minbEs} примерно совпадает со значением f_oE+f_H .

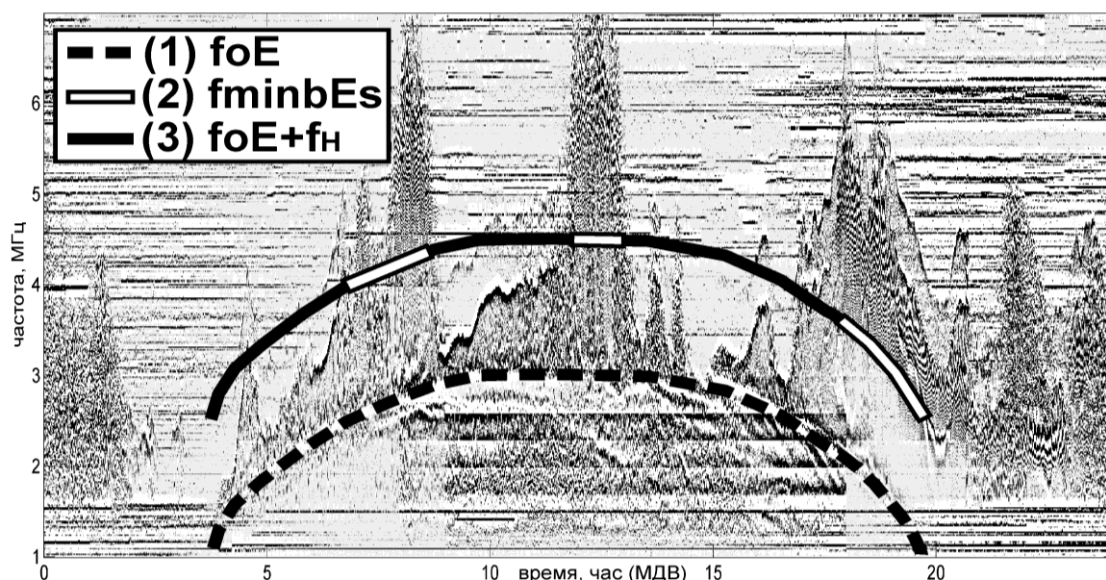


Рис. 2. Пример А-карты (суточных вариации АЧХ слоев E и Es) в координатах частота-время-амплитуда 20 мая 2010г.

Следовательно, по начальной границе диапазона биений на следах Es можно оценить критическую частоту слоя E, расположенной в частотном диапазоне ниже частотного порога ионозонда.

Выполнена аппроксимация профиля электронной концентрации ниже максимума слоя E на основе модели IRI-90. Показано, что параметры интерференционной картины следов Es можно использовать для уточнения параметров профиля электронной концентрации ниже максимума E-слоя.

Таким образом, тонкая структура отражений от слоя Es исследована экспериментальным путем методом вертикального зондирования с 1 минутной периодичностью регистрации ионограмм. Приведенные факты о высотных и частотных вариациях квазипериодических биений АЧХ следов Es позволили заключить, что наблюдаемые биения на частотах выше $f_oE + f_H$, главным образом, происходят из-за интерференции о- и х-мод от тонкого слоя Es.

В заключении сформулированы основные выводы, полученные в данной диссертационной работе:

1. Спроектирована и изготовлена новая система управления ионозонда "Циклон" с синхронизацией от GPS-часов (необходимой для реализации наклонного зондирования), позволяющая организовать измерения в учащенном режиме, и применять алгоритм определения действующей высоты с повышенной точностью. Новая система управления спроектирована и изготовлена на современной элементной базе.
2. Проведена оценка точности определения действующей высоты отражения новой системы управления на тестовых ионограммах с искусственными следами и на ионограммах, содержащих следы многократных отражений от Es-слоя. Результаты определения точности на искусственных ионограммах

с длительностью импульсов 70 мкс при большом отношении сигнал/шум составили 70-80 м, а на реальных ионограммах со следами слоя Es ~300 м (при типовой точности 2,5 км).

3. Проведен продолжительный эксперимент по исследованию отражающих свойств слоя Es с 1 мин периодичностью регистрации ионограмм в течении 2010 г. При обработке данных были:
- а) разработаны новые формы представления долговременных последовательностей ионограмм, позволяющие не только наглядно показывать вариации действующих высот отражения, критических (предельных) частот, но исследовать тонкую структуру отражений слоев ионосферы;
 - б) найдены квазипериодические биения на АЧХ следов Es и исследованы их свойства. Установленные факты о высотных и частотных вариациях диапазона биений следов Es позволили заключить, что квазипериодические биения сигналов, отраженных от слоя Es, происходят из-за интерференции магнитоионных компонент (о- и х-мод), и мы имеем дело с поляризационным интерферометром с чувствительностью ~200 м. На частотах появления интерференционных биений частотное расстояние между последовательными минимумами соответствует 30-45 кГц, с увеличением частоты зондирования это расстояние увеличивается до 150-700 кГц. Частотному расстоянию между последовательными минимумами в 700 кГц соответствует разница между действующими высотами о- и х-мод в 0,21 км. Частотная протяженность диапазона биений варьируется от 0,5 МГц до 2,5 МГц;
 - в) определены вероятности появления слоя Es в зависимости от структуры отражения. В июне 2010 г. при ~82% среднемесячной полной вероятности появления отражений от слоя Es, наибольшая условная вероятность, с величиной 73%, наблюдается у слоя Es со свойствами рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Вероятность появления слоя Es без биений составила 15%, а с биениями – 12%;
 - г) выявлена зависимость частотного расстояния между последовательными минимумами АЧХ от частоты зондирования;
 - д) выполнены модельные расчеты групповых задержек о- и х-мод слоя Es с учетом магнитного поля Земли в зависимости от электронной концентрации Е-слоя (на основе профилей IRI), показавшие, что по начальной границе диапазона биений следов Es можно оценить критическую частоту слоя E. Параметры интерференционной картины следов Es можно использовать в оценке параметров профиля электронной концентрации Е-слоя.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Акчурин А.Д., **Юсупов К.М.** Система управления ионозонда «Циклон» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия "информатика. телекоммуникации. управление". – 2010. – Вып.5 – С.49-56.
2. Акчурин А.Д., **Юсупов К.М.** Частотные свойства биений на АЧХ среднеширотного слоя Es. // Учен. зап. Казан. ун-та. – 2011. – Т.153. – кн.1. – С.7-16.

Публикации в других научных изданиях:

1. Акчурин А.Д., **Юсупов К.М.** РСІ-блок управления ионозонда "Циклон". Аппаратная часть. // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – 2010. – Вып.23. – С.81-90.
2. Акчурин А.Д., Латыпов Р.Р., **Юсупов К.М.** РСІ-блок управления ионозонда «Циклон». Конфигурирование ПЛИС. // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – 2010. – Вып.23. – С.91-99.
3. Акчурин А.Д., **Юсупов К.М.** Генераторы гармонических сигналов на интегральных микросхемах прямого цифрового синтеза частот. // Доклады 25-29 октября 2010г. Всероссийской научно-практической конференции - Высокочастотная связь, электромагнитная совместимость, обнаружение и плавка гололеда на линиях электропередачи (Казанский Государственный Энергетический Университет). Изд-во КГЭУ. – 2010. – С.146-153.
4. Акчурин А.Д., **Юсупов К.М.** РСІ-блок управления ионозонда "Циклон". // Сборник докладов второй Волжской региональной молодежной научной конференции 11-12 декабря 2009г. – "Радиофизические исследования природных сред и информационные системы" (Казань-Зеленодольск). Сборник докладов. Изд-во КГУ. – 2010. – С.128-131.
5. Акчурин А.Д., **Юсупов К.М.** РСІ-блок управления ионозонда "Циклон". // Материалы докладов 28-29 апреля 2010г. V международной молодежной научной конференции – "Тинчуринские чтения" (Казанский Государственный Энергетический Университет). Изд-во КГЭУ. – 2010. – С.120-121.
6. Akchurin A.D., Bochkarev V.V., **Yusupov K.M.** Short-period variations of virtual heights of the middle ionosphere by vertical sounding with enhanced precision. // Abstracts. IRI/COST 296 Workshop «Ionosphere «Modelling, Forcing, Telecommunications», Prague. Czech Republic. 10-14 July 2007. – P.32

Список используемой литературы:

1. Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева СЛ., Шефтель В.М. Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. – М.: Наука, 1975. – 120с.
2. Whitehead J.D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. // J. Atm. Terr. Phys. – 1989. – V.51. – P.401-424.
3. Шерстюков О.Н. Отражающая способность среднеширотного спорадического слоя E. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Казань, 1989. – 200с.
4. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн. – М.: Наука, 1972. – 564с.
5. Дробжев В.И., Куделин Г.М., Нургожин В.И., Пеленицин Г.М., Рудина М.П., Троицкий Б.В., Яковец А.Ф. Волновые возмущения в ионосфере. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 178с.
6. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, 1982. – 198с.
7. Троицкий Б.В. Отклик сигнала радиозондирования на ионосферные неоднородности. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 164с.
8. Акчурин А.Д., Бочкарев В.В. Повышение высотного разрешения импульсного ионозонда при зондировании когерентными импульсными сигналами. // Уч. зап. КГУ, – 2008. – Т.150. – Кн.3. – С.5-12.
9. Akchurin A.D., Bochkarev V.V. Improved precision of virtual height measurements with coherent radio pulse sounding based on the maximum likelihood method. // Adv. Space Res. – 2009. – V.43. – P.1595–1602.
10. Chessell C. I., Thomas J. A., Bourne I. A. Experimental observations of the amplitudes of Es and F-region reflections and their comparison with the thin-layer model for Es. // J. Atmos. Terr. Phys. – 1973. – V.35. – P.545-561.
11. Miller K. L., Smith L.G. Incoherent scatter radar observations of irregular structure in mid-latitude sporadic E layers. // J. Geophys. Res. – 1978. – V.83. – P.3761–3775.
12. Turunen T., Nygren T., Jalonen L. Observations of the reflection coefficient of the sporadic E-layer at high latitudes. // J. Atmos. Terr. Phys. – 1980. – V.42. – P.147-154.
13. Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Система управления ионозонда «Циклон». // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия "Информатика. Телекоммуникации. Управление". – 2010. – Вып.5(108). – С.49-56.
14. Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Частотные свойства биений на АЧХ среднеширотного слоя Es. // Учен. Зап. Казан. ун-та. – 2011. – Т.153. – кн.1. – С.7-16.